



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Integración de herramientas de decisión multicriterio en el análisis de políticas estratégicas para el sistema energético

Integration of multi-criteria decision tools into the analysis of strategic policies for the energy sector

Autor

Santiago Salas Mendívil

Director

Alberto Turón Lanuza

Facultad de Economía y Empresa

2021

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Contexto respecto al planteamiento	2
1.2. Objetivos	5
1.3. Conocimientos previos	5
2. MARCO TEÓRICO	6
2.1. Sistema generador de modelos TIMES	6
2.1.1.Sistema <i>Bottom-up</i> : <i>Commodities</i> y tecnologías.....	6
2.1.2.Principios económicos de TIMES	9
2.1.3.Problema de optimización de TIMES	11
2.2. Decisión multicriterio.....	13
2.3. Analytic hierarchy process (AHP)	15
3. METODOLOGÍA.....	16
3.1. Análisis en el sistema TIMES mediante escenarios.....	17
3.2. Modelización en TIMES y multiplicidad de criterios	21
3.3. Aplicación práctica mediante AHP	24
3.3.1.Escenarios <i>base</i>	25
3.3.2.Escenarios <i>variable</i>	28
3.3.3.Alternativas	29
3.3.4.Jerarquía AHP	31
4. RESULTADOS	37
5. CONCLUSIONES.....	40
6. BIBLIOGRAFÍA.....	43

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo plantea una metodología novedosa para la selección de políticas en materia energética. Se ha buscado la integración del sistema de generación de modelos para el análisis de escenarios TIMES con la herramienta para la toma de decisiones multicriterio AHP. Este enfoque podría ser útil para superar las deficiencias de algunos trabajos precedentes en el análisis de los datos obtenidos a través de TIMES para la toma de decisiones. Para defender esta afirmación conviene describir el proceso que nos ha llevado a centrarnos en el desarrollo de esta metodología integradora.

Contexto respecto al planteamiento

La idea fundacional para este trabajo confluía en torno a la utilización de las herramientas de análisis multicriterio para la toma de decisiones públicas relacionadas con sistemas energéticos. Estas herramientas resultan eficaces ante esta clase de problemas porque la existencia de numerosas externalidades en la gestión de sistemas energéticos a escala nacional provoca que en estas decisiones concurren una gran variedad de criterios (económicos, medioambientales, sociales, etc.).

En la búsqueda de datos para el planteamiento del problema multicriterio se decidió consultar el Estudio Ambiental Estratégico realizado para el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030 (Ministerio Para la Transición Ecológica y Reto Demográfico [MITECO], 2020). Este estudio podía resultar particularmente adecuado para plantear un problema práctico basado en un enfoque multicriterio porque presentaba datos numéricos de numerosas valoraciones realizadas por expertos sobre distintas políticas y fuentes de energías en base a una gran variedad de criterios.

Antes de iniciar el trabajo se decidió profundizar en este estudio para ver la metodología utilizada en la selección de la estrategia óptima para el país en materia energética. Se encontró que la valoración de los efectos del plan se realizaba de forma posterior a la selección del escenario objetivo de desarrollo energético. Este planteamiento es sorprendente, dado que se puede considerar que dichas variables deberían haber sido utilizadas para la toma de decisiones. Resulta problemático que el cálculo de la previsión de los efectos del plan escogido se realice con carácter posterior a la toma de decisión, ya que consideramos que dicha información debería haber sido utilizada antes de tomar la decisión.

Para la selección del plan óptimo en este estudio ambiental se utilizó TIMES (Loulou, 2021), un sistema de generación de modelos a través de escenarios que se utiliza a nivel mundial para el análisis de sistemas energéticos a largo plazo. La utilización de este modelo tiene tres objetivos en el estudio ambiental publicado por el Ministerio para la transición ecológica (MITECO, 2020):

1. Determinar conjuntos de políticas que permitan alcanzar los objetivos de reducción de emisiones impuestos por la UE.
2. Obtener previsiones respecto al sistema energético español bajo el supuesto de que se apliquen las políticas anteriores, lo que permitirá analizar los efectos ambientales y sociales que tendrá la transición energética en España durante los próximos 10 años.
3. Comparar los distintos conjuntos de políticas que posibilitan el cumplimiento de los límites de emisiones según “cuestiones no incluidas en la modelización”, es decir, un conjunto de criterios más amplio y no necesariamente económico.

Para este tercer objetivo el Estudio Ambiental Estratégico presenta el ejemplo de tres opciones consideradas con relación a la energía nuclear. Estas opciones se incluyen en el modelo manteniendo el resto de las restricciones de descarbonización constantes. Posteriormente se analiza si las opciones permiten alcanzar una serie de objetivos según criterios de desarrollo económico, impacto ambiental, efectos sociales e implicaciones de seguridad nacional. Sin embargo, no se especifica como se ha realizado este análisis posterior: el estudio solo da un análisis descriptivo del grado de cumplimiento de los objetivos planteados, sin presentar la metodología utilizada. El resumen de este análisis se presenta en la siguiente tabla, extraída del Plan Ambiental.

SÍNTESIS COMPARATIVA DE LAS OPCIONES ESTRATEGICAS		Opción 0 (E.0+N.0)	Opción 1 (E.1+N.1)	Opción 2 (E.1+N.0)	Opción 3 (E.1+N.2)
GRUPOS DE CRITERIOS	Cumplimiento de objetivos en materia de energía y clima	0.1	1.1	2.1	3.1
	Impacto sobre el desarrollo económico	0.2	1.2	2.2	3.2
	Impacto sobre el medio ambiente y salud pública	0.3	1.3	2.3	3.3
	Efectos sociales y territoriales	0.4	1.4	2.4	3.4
	Implicaciones de seguridad nacional	0.5	1.5	2.5	3.5

	Opción contraindicada por incumplir los objetivos básicos que delimitan el marco de planificación y/o por presentar riesgos críticos en relación el criterio considerado
	Opción que puede plantear dificultades para el cumplimiento de los objetivos básicos y/o que entraña riesgos significativos respecto al criterio considerado
	Opción que permiten alcanzar un nivel de cumplimiento adecuado de objetivos básicos y que no implican riesgos significativos respecto a los criterios considerados

Tabla 1 Fuente: Plan Ambiental Estratégico PNIEC (2020)

La valoración de las distintas opciones según cada uno de los criterios resumida en la tabla anterior y publicada en el Plan Ambiental tiene un carácter eminentemente descriptivo, sin referencia a ningún dato concreto. Como ya he señalado, el análisis en profundidad de los efectos sobre diversos criterios del plan ambiental se presenta como una etapa posterior a la decisión, por lo que surgen dudas respecto a la valoración de las opciones analizadas. Por otro lado, tampoco se presenta la metodología utilizada para tomar una decisión basada en dicha valoración ni el peso/ponderación que se le aporta a cada criterio. Todo ello nos hace plantearnos si el método utilizado para decidir entre las distintas alternativas es el idóneo.

Ante esta situación se plantea la duda de qué herramientas y qué metodología deberían utilizarse para responder a este problema de decisión. Tal y como se presenta el problema nos parece evidente que para la selección de la opción óptima es necesario utilizar alguna herramienta estadística de decisión multicriterio.

Nuestra meta principal será responder a esta cuestión desarrollando una metodología que pudiera ser aplicada para otros estudios posteriores que se valgan del sistema TIMES. El procedimiento replicará en cierta medida la modelización mediante TIMES que se realiza en trabajos similares al estudio ambiental aquí mencionado. La principal diferencia será que para la toma de decisión se utilizarán herramientas multicriterio sobre los datos obtenidos mediante TIMES.

Para ilustrar esta metodología se realizará una aplicación práctica a partir de las Demos gratuitas publicadas por ETSAP, los principales desarrolladores de TIMES (ETSAP, 2021). En concreto, se utilizará el ejemplo de sistema energético presentado en la “Demo 12” para construir los modelos que nos permitirán obtener los datos para el problema de decisión.

En la revisión bibliográfica se ha encontrado que una metodología similar a la que se desarrollará aquí ya se ha aplicado con anterioridad, pero no mediante las herramientas aquí presentadas. Otros trabajos no relacionados con la política energética ya han tratado

de integrar las capacidades de herramientas de planificación de escenarios con herramientas de análisis de decisión multicriterio (Ram et al, 2011). Esto permite superar las limitaciones que presentan cada una de ellas por separado. Este enfoque también ha sido utilizado para medir la idoneidad de ciertas políticas en materia energética incluyendo criterios medioambientales (Hasan et al, 2020). Sin embargo, el desarrollo de este procedimiento es reducido y no se ha encontrado ninguna publicación que utilice una metodología similar con el sistema TIMES. La importancia de este sistema en el análisis de sistemas energéticos a nivel mundial nos empuja a desarrollar este trabajo.

Con todo, los trabajos anteriores nos proporcionan una idea aproximada sobre los pasos a seguir para abordar este problema. El proceso consistirá en desarrollar una serie de políticas energéticas entre las que decidir; posteriormente se realizarán previsiones respecto a los efectos de dichas políticas sobre el sistema energético objeto de estudio a través del sistema TIMES; por último, se trabajará con dichas previsiones a través de la metodología multicriterio para decidir cuáles son las políticas óptimas.

Objetivos

Gracias a la explicación anterior podemos definir los principales objetivos que debe perseguir este trabajo:

- Explicar los fundamentos teóricos y el funcionamiento práctico del sistema generador de modelos mediante escenarios TIMES.
- Desarrollar una metodología que permita integrar el sistema TIMES con las herramientas de decisión multicriterio. Esto incluirá los siguientes subobjetivos:
 - Presentar los distintos enfoques de decisión multicriterio para seleccionar la herramienta que mejor se adapte a nuestro problema.
 - Explicar el funcionamiento de la herramienta seleccionada.
 - Modelizar un ejemplo práctico que permita ilustrar la utilidad de la metodología desarrollada para posibles trabajos futuros basados en escenarios reales.

Conocimientos previos

Para alcanzar los objetivos perseguidos por este trabajo es necesario presentar tanto los fundamentos teóricos de las metodologías TIMES y AHP como su aplicación práctica, haciendo especial referencia a su funcionamiento a través de los principales softwares de cada uno de los sistemas (VEDA y Expert Choice, respectivamente). Esto no sería posible

sin algunos de los conocimientos teóricos y habilidades adquiridos en el Grado en Economía de la Universidad de Zaragoza.

La explicación de la base teórica de TIMES requiere cierto grado de conocimiento de la teoría económica para comprender los principios microeconómicos sobre los que se sustenta el sistema. También es necesario una comprensión básica de los problemas de programación lineal y del teorema de dualidad para entender su funcionamiento.

Por otro lado, la modelización del problema y la utilización de la metodología AHP requiere de habilidades que se han desarrollado en asignaturas como Estadística II y Gobierno Electrónico y Decisiones Públicas. Todo ello nos hace defender la idoneidad de esta problemática como base para desarrollar un Trabajo de Fin de Grado en Economía.

MARCO TEÓRICO

Sistema generador de modelos TIMES

En este apartado trataremos de explicar tanto los fundamentos teóricos del sistema TIMES como los principios en los que se basa el trabajo de modelización mediante este sistema. Aunque se podría utilizar TIMES ignorando en cierta medida los supuestos económicos y los planteamientos matemáticos sobre los que se sustenta el sistema, se ha considerado que sin la correcta explicación de los mismos este trabajo estaría incompleto.

La comprensión de estos fundamentos ha venido facilitada por la abundante documentación del modelo TIMES disponible en la web de sus desarrolladores (ETSAP, 2021). Esta extensa documentación es uno de los motivos por los que este sistema se ha convertido en el máximo referente de código abierto en la modelización de escenarios energéticos. También han resultado de utilidad las Demos gratuitas publicadas por ETSAP (los principales desarrolladores de TIMES) para explicar el funcionamiento del software VEDA (Goldstein et al, 2020). Estas Demos nos servirán tanto para explicar el funcionamiento de TIMES como para realizar el caso práctico que ilustra la metodología con la que tratamos de unir TIMES y AHP.

Sistema *Bottom-up*: *Commodities* y tecnologías

El sistema TIMES forma parte de un conjunto de modelos denominados *bottom-up*. Estos modelos parten desde los cimientos del sistema eléctrico hasta llegar a la demanda: en lugar de utilizar agregados macroeconómicos y técnicos para realizar predicciones en

materia de demanda energética los modelos *bottom-up* tratan de modelar explícitamente la totalidad del sistema, especificando los costes de cada una de las relaciones de transformación que siguen las materias primas hasta satisfacer la demanda energética.

Este tipo de modelos se basa en bienes y servicios (*commodities*) y tecnologías. A través de las tecnologías un conjunto de *commodities* (una, varias o ninguna en el caso de extracción de materias primas) se transforma en otro conjunto distinto. Las tecnologías tienen una serie de atributos: eficiencia, límite de capacidad, coste de inversión (para aumentar capacidad), costes fijos, costes variables, etc. En estos modelos los sectores se constituyen por “un número (generalmente grande) de tecnologías ordenadas lógicamente y relacionadas a través de sus inputs y outputs (*commodities*, que pueden ser formas de energía, materiales, emisiones y/o demandas de servicios)” (Loulou, 2021).

Fijémonos en el siguiente ejemplo de un sector de carbón (COA), extraído de los Demos de VEDA desarrollados por ETSAP y representado en la siguiente imagen:

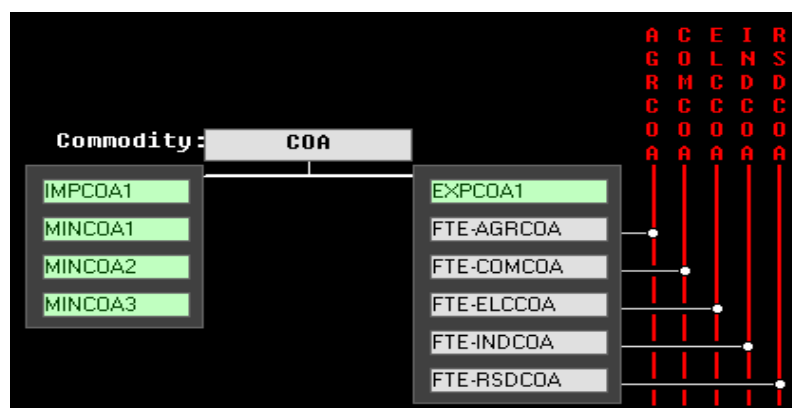


Ilustración 1 Fuente: Demos VEDA

El carbón se puede obtener (MIN: minar) a través de tres tecnologías distintas (MINCOAi) o se puede importar (IMPCOA1). Cada una de las tecnologías tendrá unos costes distintos y unos límites de capacidad. A través de ellas se obtendrán las cantidades demandadas de carbón, que se somete a otra serie de tecnologías para convertirse en carbón destinado al sector agrícola (agrcoa), al comercial (comcoa), al sistema eléctrico (elcco). El proceso seguirá hasta que se llega a las demandas finales de *commodities*.

Por ejemplo, la *commodity* ELCCOA (carbón para electricidad) se someterá a distintas tecnologías que representan centrales térmicas para convertirse en la *commodity* electricidad. Posteriormente esa electricidad se someterá a otras tecnologías, que representan la red de distribución eléctrica, y pasará a convertirse en una *commodity* disponible para satisfacer las demandas efectivas finales de los distintos sectores que

componen la economía -que en el modelo TIMES suelen agruparse en sector agrícola, industrial, comercial, residencial y transporte-. Pero el proceso no acaba ahí. Por ejemplo, la energía eléctrica residencial se dividirá según se use para calefacción, para electrodomésticos o para otros usos. La gran cantidad de relaciones de transformación dificulta la representación de la totalidad del sistema energético en un solo esquema, pero sí suelen utilizarse esquemas parciales para representar sectores, como el anterior esquema de carbón.

Cada una de las transformaciones del sistema podrá realizarse a través de varias tecnologías alternativas, que tendrán unos atributos concretos. Centrémonos ahora en dichos atributos, debido a la importancia que tienen para el modelo. Volvamos a nuestro ejemplo anterior, en el que el carbón podía obtenerse a través de tres tecnologías de minería alternativas o mediante importaciones. La tabla que utiliza el modelo para representar estas transformaciones es la siguiente:

TechName	Comm-IN	Comm-OUT	CUM	COST	ACT_BND
*Technology Name	Input Commodity	Output Commodity	Reserves Cumulative Value	Cost	Annual Production Bound
*Units			PJ	M€2005/PJ	PJ
MINCOA1		COA	80000	2,00	3948
MINCOA2		COA	160000	2,50	1316
MINCOA3		COA	3000000	3,00	
IMPCOA1		COA		2,75	
EXPCOA1	COA			2,75	746

Tabla 1 Fuente: Demos VEDA

En general, en los modelos TIMES cada tecnología obtiene uno (o más) *outputs* a través de uno (o más) *inputs*. Este caso es excepcional: no es necesario input, pues se trata de obtención de materias primas. También hay que señalar que un gran número de tecnologías generan al menos dos *outputs*: la *commodity* deseada y CO₂. El proceso de transformación conlleva un coste característico de cada tecnología, y suele estar limitado por un límite de producción anual. Este límite generalmente puede aumentarse mediante gasto en inversión en nueva tecnología, que suele ser más barata que la tecnología preexistente.

Haciendo un inciso, es necesario considerar que la mayoría de las tecnologías de los sectores representados incluyen muchos más atributos que los que se presentan en esta

tabla. Se ha elegido este ejemplo del sector del carbón por su simplicidad, que permite entender con mayor claridad la explicación del sistema TIMES. Aun así, cabe señalar ahora que otros atributos como los costes variables y fijos, la eficiencia o la capacidad de contribuir a los picos de demanda suelen estar presentes en todas las tecnologías. Para entender esta explicación basta con saber que estos atributos existen y que también forman parte del problema de optimización de TIMES, que se expondrá en seguida.

Principios económicos de TIMES

Para continuar avanzando en la explicación es necesario presentar los supuestos económicos sobre los que se sustenta el modelo TIMES. Loulou (2021) define este sistema como un modelo de “equilibrio parcial (con elasticidad precio para las demandas de servicios energéticos) en mercados competitivos con expectativas racionales (*perfect foresight*). Se demuestra que dicho equilibrio provoca la igualdad entre precio y coste marginal en todas las *commodities*”.

Esta igualación entre el coste marginal y el precio definida por Loulou supone que la cantidad demandada (y ofertada, debido al supuesto de *perfect foresight*) se corresponderá al punto en el que se cortan las curvas de oferta y demanda de la economía. Este es, a su vez, el punto en el que se maximiza el área comprendida entre ambas curvas. En la teoría económica esto se interpreta como la maximización del excedente global y está generalmente aceptado que este es el punto al que tenderá la economía de forma natural bajo los supuestos aceptados por el modelo¹.

Entender estos supuestos es fundamental para comprender el funcionamiento del modelo TIMES. El núcleo de este modelo viene constituido por un programa de maximización lineal (que se explicará a continuación) sujeto a ciertas restricciones y cuya variable objetivo es el excedente global. Pero esto no debe interpretarse tan solo como la búsqueda del óptimo en el sistema energético, sino como la conclusión (o previsión) realizada por TIMES sobre el desarrollo futuro de un sistema energético debido a los supuestos económicos sobre los que se cimienta.

Volvamos ahora al caso del carbón explicado en el apartado anterior. Observamos en la *Tabla 2* que el coste de esta materia prima se mide en millones de euros por petajulio de

¹ Desarrollos posteriores del modelo TIMES tratan de superar las limitaciones de estos supuestos. Particularmente, destacan los intentos por representar el equilibrio general y por desarrollar el supuesto de *limited foresight*, frente al de *perfect foresight*. En este trabajo ignoraremos estos desarrollos y nos centraremos en el modelo TIMES básico.

energía extraída en forma de carbón. El petajulio extraído mediante la tecnología MINCOA1 tiene un coste de dos millones de euros, el de la tecnología MINCOA2 de 2,5 millones, el de la tecnología MINCOA3 de tres millones y el importado (tecnología IMPCOA1) de 2,75 millones de euros.

Como hemos apuntado, el modelo TIMES se basa en la maximización del excedente global. Debido al teorema de dualidad, este problema de optimización se puede expresar también como la minimización del *coste global*. En el ejemplo del carbón, esto significa que mientras la cantidad demandada sea inferior a 3948 PJ toda la demanda se obtendrá mediante la tecnología MINCOA1. Por los supuestos económicos en que se basa el modelo el precio de los bienes se iguala al coste marginal de producción, por lo que en este caso será de dos millones de euros por petajulio. En cambio, si la demanda supera los 3948 PJ la tecnología MINCOA2 entrará en funcionamiento, lo que implicará una subida del precio del carbón hasta el nuevo coste marginal, 2,5 M€/PJ.

Dado que no se han establecido límites a la importación de carbón en el modelo y el precio de importar es inferior al precio de obtener carbón mediante la tecnología MINCOA3, esta última tecnología nunca entrará en funcionamiento. Por tanto, el precio máximo del carbón en esta representación de la economía será de 2,75 M€/PJ.

Este ejemplo muestra que la curva de oferta será una función escalonada. El coste marginal de la oferta se igualará al coste de la tecnología más barata y la función será horizontal hasta que se alcance el límite de producción de la misma, punto en el que el precio subirá hasta que se iguale al coste de la siguiente tecnología más barata. Desde ese punto, la función volverá a tener pendiente nula hasta que se alcance el límite de esta segunda tecnología, y así sucesivamente. Esto se puede observar en los dos gráficos siguientes, obtenidos de la parte 1 documentación para TIMES.

La ilustración 2 representa el esquema de equilibrio de una demanda energética final, mientras que la ilustración 3 representa un equilibrio intermedio. Se aprecia la forma escalonada de las funciones de oferta y la función de demanda intermedia. Todas ellas vienen determinadas implícitamente por el modelo según los datos proporcionados. La función de la curva de demanda final debe establecerse explícitamente.

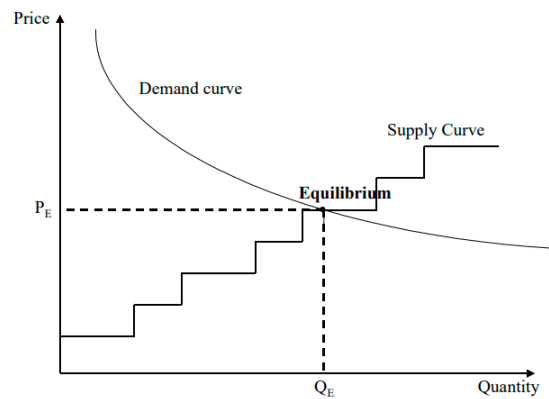


Ilustración 2 Fuente: Loulou 2021

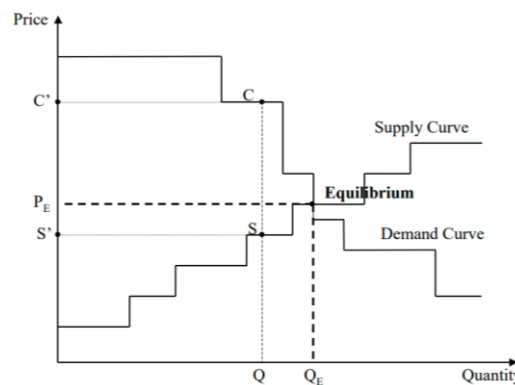


Ilustración 3 Fuente: Loulou 2021

Problema de optimización de TIMES

Como se ha señalado, la metodología TIMES se basa en un problema de optimización que trata de maximizar el sumatorio de las áreas comprendidas entre todas las curvas de oferta y de demanda del modelo. El ejemplo del carbón es un caso extremadamente simple por dos motivos:

- Hemos representado solo un sector, no el conjunto del sistema energético. Esto provoca, por ejemplo, que no haya que decidir hacia qué demanda final se va a destinar una *commodity* concreta a partir de las tecnologías disponibles.
- La curva de oferta que se deriva de los datos introducidos es fija. En un modelo normal se permite la inclusión de nueva tecnología a través de inversión. Esta inversión aumentará el límite capacidad productiva y generalmente presentará un coste marginal más bajo; pero también conllevará un coste de inversión, considerado en la función de optimización. Este factor es el que nos lleva a decir que las curvas de oferta se generan intrínsecamente en el modelo.

El problema de optimización concreto al que se enfrenta el modelo es el siguiente:

- I. $\text{Min } c \cdot X$
- II. s.a. $\text{Commodity}_{k,i}(t) \geq \text{Dem.Final}_{i}(t) \quad i = 1, 2, \dots, I; t = 1, \dots,$
- III. s.a. $B \cdot X \geq b$

- La expresión I. representa la función objetivo del problema de minimización, siendo X las variables del modelo y c el vector de costes. Al resultado de esta expresión le denominaremos *coste global*, e incluirá: los costes fijos y variables de producción, los costes de inversión, la diferencia entre importaciones y exportaciones, y los costes derivados de la reducción la producción debido a cambios en los precios.
- La expresión II. indica que el modelo debe satisfacer la demanda de todas las *commodities* en cada uno de los periodos.
- La expresión III. representa las restricciones que puede establecer el usuario (denominadas escenarios) y con las que se construyen los distintos modelos (o alternativas) sobre los que trabajaremos. Debido a que el trabajo práctico con el sistema TIMES se basa en estos escenarios una explicación más detallada será presentada en la sección de metodología.

Uno de los escenarios más importantes es la restricción al volumen total de emisiones de CO₂. Esta es una limitación a la que actualmente se ven sometidos la mayoría de los países, por lo que nos vemos obligados a incluirla en nuestra modelización. Escenarios similares pueden desarrollarse a partir de restricciones a otras *commodities* o tecnologías -por ejemplo, podría limitarse el volumen total de energía eléctrica producida en centrales nucleares. También son especialmente relevantes para este trabajo los escenarios que funcionan como subvenciones e impuestos a *commodities* concretas o a conjuntos de estas.

Estos escenarios no solo permiten realizar comparaciones entre los resultados previsto en la economía de distintas restricciones: en algunos casos también permiten determinar cuáles son las políticas óptimas para alcanzar unos objetivos concretos. Así el modelo TIMES supera su carácter de herramienta de predicción y se convierte también en una herramienta para la toma de decisiones. Nos centraremos en límite en el volumen total de emisiones de CO₂, porque su correcta interpretación será necesaria en apartados posteriores del trabajo

Cuando incluimos un límite en el volumen de emisiones el proceso de optimización se ve obligado a seleccionar procesos menos eficientes para obtener las *commodities* que

satisfagan las demandas. Esto conllevará además una subida de precios y supondrá un aumento del *coste global* del modelo. También obtenemos el coste marginal del CO₂ para el sistema, es decir, el coste monetario que supone para el modelo impedir la última unidad de emisiones de CO₂. En la práctica esto se puede interpretar como la cantidad de impuesto necesaria para que esta emisión no se produzca: cuando el impuesto sea más alto que el coste para la empresa de usar un método de producción alternativo estas emisiones no se producirán.

Por tanto, alcanzaremos el objetivo de emisiones estableciendo un impuesto unitario igual al coste marginal del CO₂ en dicho punto. Al darnos este coste marginal (*shadow price* del CO₂) el modelo TIMES favorece la toma de decisiones políticas óptimas para lograr unos objetivos concretos en un sistema energético determinado.

Decisión multicriterio

Se puede definir la Decisión Multicriterio como “la resolución de problemas de decisión complejos donde los criterios y objetivos pueden ser múltiples” (Romero, 1993). Esta clase de problemas son los que se encuentran con mayor frecuencia en la realidad. Cuando un individuo toma una decisión generalmente se ve obligado a elegir entre factores contrapuestos, teniendo que posicionarse frente a los posibles *trade-offs* del problema. El conjunto de metodologías multicriterio surge como un apoyo a la decisión que permite afrontar las características de estos problemas, tal y como señala Moreno (2002):

“Características de los problemas altamente complejos, como son el dinamismo, la incertidumbre, la existencia de múltiples escenarios, criterios (habitualmente en conflicto) y actores, y, en especial, la necesidad de incorporar en la toma científica de las decisiones la opinión (visión de la realidad) de los diferentes participantes en la resolución del problema (actores), obligan a plantear aproximaciones metodológicas más abiertas, flexibles, realista y efectivas que el enfoque tradicional”

Una distinción común del conjunto de problemas multicriterio es la que divide los problemas de *evaluación* y los problemas de *diseño* (también llamados problemas de *programación matemática multiobjetivo*). Los primeros parten de un número finito de alternativas conocidas antes de comenzar a solucionar el problema, mientras que en los segundos no se conocen dichas alternativas, sino que se obtienen a través de la resolución de un modelo matemático (generalmente de naturaleza continua). Este segundo tipo de problemas suele basarse en el cálculo del conjunto de alternativas eficientes entre las que

el decisor deberá elegir. Por ejemplo, un gran número de estos problemas se pueden solucionar desde una perspectiva geométrica, obteniendo el conjunto de puntos límite que podrían maximizar la utilidad del agente decisor.

El caso tratado por este trabajo presenta las características propias de un problema multicriterio de *evaluación*. Al tratar de determinar un plan estratégico para el sector energético el agente decisor considera un número limitado de posibles políticas. Las alternativas del problema se reducirán, por tanto, al conjunto de combinaciones de dichas políticas que podrían aprobarse. El objetivo de nuestro problema no será encontrar el conjunto de soluciones eficientes, como en un problema de *programación matemática multiobjetivo*, sino establecer una jerarquía del conjunto de combinaciones de políticas posibles según las preferencias subjetivas del agente decisor.

Es importante remarcar que la resolución de problemas multicriterio siempre tendrá un componente subjetivo, dado que los pesos que se establecen para cada uno de los criterios dependerán de la visión personal del decisor. Pongamos un ejemplo relacionado con la temática de este trabajo: imaginemos el caso probable de que la aplicación de cierta política energética tiene consecuencias económicas, medioambientales y en materia de equidad. La importancia que se da a cada una de estas consecuencias tiene un carácter innegablemente subjetivo. Aun así, resultaría adecuado que estas preferencias subjetivas tuvieran carácter público y que el procedimiento por el que se eligiera una alternativa a partir de estas preferencias fuera riguroso.

Debemos realizar una última aclaración respecto a la clasificación del problema multicriterio presentado en este trabajo. Nuestro problema tal vez se podría plantear desde una perspectiva de *programación matemática multiobjetivo*. Frente a la argumentación de que el número de políticas es limitado se puede objetar que muchas de estas políticas se pueden expresar como funciones continuas. Por ejemplo, un impuesto por unidad de emisión de CO₂ puede tomar cualquier cifra dentro de los números reales. Esto implica que el número de posibles alternativas ya no es limitado, sino infinito. Sin embargo, debido al método de trabajo mediante escenarios del sistema TIMES, que se explicará más adelante, nos vemos obligados a rechazar este enfoque, que podría servir como base para futuros trabajos.

Analytic hierarchy process (AHP)

En las secciones posteriores de este trabajo se ilustrará mediante un ejemplo práctico la metodología AHP, desarrollando una jerarquía de criterios y estableciendo los pesos de cada uno de ellos mediante comparaciones a pares. Sin embargo, resulta conveniente señalar, *grosso modo*, los fundamentos teóricos de esta herramienta.

Según Moreno (2002), la utilidad de la metodología AHP reside en que permite “llevar un problema multidimensional (multicriterio) a un problema en una escala unidimensional (escala de prioridades) en la que se representan las salidas globales”. De este modo se permite formalizar matemáticamente el proceso mental seguido por el individuo en la toma de decisiones.

La construcción de la jerarquía parte de la división por niveles. En el nivel superior se coloca la meta global del problema, es decir, el objetivo que se quiere conseguir. En los niveles se estructura la jerarquía mediante los distintos criterios y subcriterios relevantes para el problema. Por último, en el nivel inferior se sitúan todas las posibles alternativas analizadas por el problema.

Esta jerarquía puede ir desde el grado máximo de simpleza (con tan solo tres niveles) hasta cualquier grado de complejidad que se quiere representar, pudiendo incluir distintos números de criterios y subcriterios. También puede ser usada para valorar varios escenarios posibles o distintos horizontes temporales. El grado de complejidad dependerá del problema concreto: es fundamental que la jerarquía incorpore todos los criterios relevantes, pero ninguno más de los necesarios.

Una vez que se ha desarrollado la jerarquía del problema, el establecimiento de los pesos de cada criterio y subcriterio dentro del problema global se realiza mediante comparaciones pareadas. Este enfoque es especialmente útil para el trabajo con aspectos intangibles, dado que permite extraer las consideraciones subjetivas de los individuos de forma más eficaz que una escala global. Generalmente se utiliza para esta comparación a pares la escala fundamental desarrollada por Saaty, que está compuesta por los números naturales entre el 1 y el 9.

Es importante que la valoración pareada no genere inconsistencias, lo que se puede estudiar con facilidad a través del software Expert Choice. Consideraremos que un grado de inconsistencia superior al 10% en cualquier sector de la jerarquía resultará incompatible con la correcta resolución del problema.

La valoración de cada alternativa dentro de cada criterio puede realizarse también mediante comparación pareada, lo que resulta especialmente apropiado para los criterios que representan intangibles y no se pueden analizar numéricamente. Sin embargo, para el presente trabajo resulta más relevante la valoración mediante *funciones de preferencia*. Estas funciones, que deben ser definidas por el decisor, permiten incorporar valores numéricos a la metodología AHP. Las principales formas que pueden adquirir son: crecientes, decrecientes o escalonadas. La curvatura de las funciones crecientes y decrecientes se define a partir de logaritmos. Como estas funciones representan preferencias de los individuos se mantendrá en este trabajo el supuesto de estricta convexidad, común en la literatura económica.

METODOLOGÍA

En esta apartado se va a describir el procedimiento utilizado para tratar de unir las posibilidades del análisis de sistemas energéticos a largo plazo mediante el generador de modelos TIMES con la herramienta de toma de decisiones multicriterio *Anlytic Hierarchy Process* (AHP). Como ya se ha señalado, el desarrollo de una metodología que permita esto es precisamente el objetivo principal de este trabajo. Este objetivo está incentivado por la ausencia de una metodología similar -o al menos la ausencia de información respecto a la misma- que presenta el Estudio Ambiental Estratégico del PNIEC (MITECO, 2020).

Un posible trabajo alternativo hubiera sido replicar dicho estudio aplicando una metodología multicriterio para la selección de la opción idónea. Esta opción fue desestimada porque la información utilizada por el ministerio no tiene carácter público y la modelización del sistema energético de la economía española desborda ampliamente los objetivos de este trabajo². La meta no es, por tanto, realizar un análisis empírico que permita obtener conclusiones de política energética aplicables a la realidad, sino más bien tratar de presentar una nueva metodología que pueda ser aplicable a estudios posteriores. La aplicación práctica de esta metodología, basada en la “Demo 12” desarrollada por ETSAP (2021), no es sino un ejemplo que permite ilustrar las posibilidades que permite

² En otra clase de sistemas de modelización la construcción de un modelo simplificado que representara a el sistema energético español hubiera sido viable, pero la necesidad de una descripción exhaustiva de la totalidad del sistema energético propia de los modelos *Bottom-up*, a los que Times pertenece, dificulta en exceso este enfoque.

la integración de TIMES y AHP. Por todo ello, el presente apartado constituye el núcleo central de este trabajo.

Nuestro trabajo se basa en publicaciones anteriores que ya buscaban integrar herramientas de análisis de sistemas energéticos y herramientas de análisis multicriterio (Hasan et al, 2020; Ram et al, 2011). Sin embargo, la revisión bibliográfica no nos ha permitido encontrar ningún otro trabajo que se base en este enfoque y utilice las herramientas aquí estudiadas (TIMES y AHP).

La correcta explicación de la metodología aquí presentada requiere la aclaración del funcionamiento práctico de cada una de las partes, es decir, los sistemas TIMES y AHP. Estos sistemas se pondrán en relación con las principales herramientas de software que facilitan su uso: el programa VEDA para el sistema TIMES y el programa Expert Choice para el sistema AHP.

Análisis en el sistema TIMES mediante escenarios

El generador de modelos TIMES para sistemas energéticos a gran escala se basa en la exploración de los posibles desarrollos de dichos sistemas a través de *escenarios*. Este enfoque resulta idóneo para el estudio en el largo plazo. Para el corto plazo un enfoque mediante proyecciones econométricas puede resultar más exacto, pero en periodos largos (como los 10 años del PNIEC) los principales componentes (*drivers*) que guían los resultados esperados pueden variar, lo que provocaría una ruptura estructural en la regresión. En los sistemas energéticos analizados esto puede producirse por numerosos factores: un desarrollo de nuevas tecnologías que modifique el coste de la oferta de energía, cambios en la demanda, la aplicación de nuevas políticas en el sector energético, etc.

El modelo TIMES trata de sobreponerse a este problema mediante los *escenarios*, que no son sino una serie de supuestos respecto a estos factores de los que se derivan las previsiones sobre la evolución del sistema energético, tal y como se explica en la documentación del modelo TIMES:

Given the long horizons that are usually simulated with TIMES, the scenario approach is really the only choice, (...) a scenario consists of a set of coherent assumptions about the future trajectories of these drivers (of the energy system), leading to a coherent organization of the system under study. A scenario builder must therefore carefully test the scenario assumptions for internal coherence (...).

[Debido al horizonte de largo plazo simulado generalmente mediante el modelo TIMES, la utilización de *escenarios* es la única opción disponible, (...) un escenario consiste en una serie de supuestos coherentes respecto a las trayectorias de los *drivers* (del sistema energético), que llevan a una organización coherente del sistema bajo estudio. El desarrollados de escenarios debe, por tanto, comprobar los supuestos del escenario para asegurar la coherencia interna] (Loulou, 2021, pp 10).

Así pues, un escenario queda definido como un conjunto de supuestos respecto a los componentes de un sistema energético concreto. Un modelo estará compuesto, a su vez, por el conjunto de escenarios que se utilizarán para desarrollar el problema de optimización lineal que constituye la base del modelo TIMES³. Las previsiones (o deducciones si se prefiere) de cada modelo dependerán de los escenarios concretos que se consideren.

La utilización de escenarios es la principal herramienta de trabajo en el sistema TIMES, por lo que resulta conveniente ilustrar las ideas anteriores mediante un ejemplo. Supongamos que actualmente se está desarrollando una tecnología que podría permitir obtener energía eléctrica solar de forma más eficiente. Se calcula que esta tecnología no estará lista hasta dentro de 5 años y no sabemos exactamente cuánto reducirá los costes de obtención de energía eléctrica. Además, existe la posibilidad de que el desarrollo de esta tecnología nunca se complete y esta no llegue a integrarse en el sistema eléctrico.

Para representar estas posibilidades mediante TIMES necesitaríamos desarrollar al menos dos escenarios adicionales a los que ya dispusiera nuestra modelización: uno que incluyera la tecnología bajo el supuesto de máxima eficiencia y otro que la incluyera bajo el supuesto de eficiencia media⁴. Esta tecnología no podría ser utilizada en el sistema energético desde el primer momento, sino a partir del quinto periodo. Esto se puede incluir en la información del escenario, puesto que tanto TIMES como el software VEDA permiten especificar un periodo concreto para la activación de una nueva tecnología.

³ La documentación de para el modelo TIMES referenciada en la bibliografía de este trabajo usa de forma intercambiable los términos “modelo” y “escenario”. Para evitar confusiones en este trabajo estos términos no se utilizarán indistintamente, sino según la definición aquí señalada.

⁴Evidentemente, las características desconocidas en un caso real de una posible nueva tecnología son mucho más abundantes. Mediante TIMES se pueden incluir con facilidad distintos valores para, entre otros, el coste de inversión, costes variables y fijos, años de vida esperada de la inversión y límites en la cantidad producida en momentos puntuales del día. La forma de trabajar si incluyéramos estos factores en el análisis o aumentáramos el número de valores posibles para cada factor no difiere significativamente de la aquí explicada. Tan solo sería necesario aumentar el nuevo de escenarios analizados.

Mediante estos dos nuevos escenarios -junto con el resto de los escenarios de los que dispusiera nuestra modelización del sistema energético concreto- podemos estudiar con facilidad las implicaciones del posible desarrollo de esta tecnología sobre la totalidad del sistema. Se establecerían tres modelos: uno que incorporara el primer nuevo escenario, otro que incorporara el segundo nuevo escenario y un tercer modelo que no incorporara ninguno de los dos (que correspondería al supuesto de que la tecnología no llega a desarrollarse).

El sistema TIMES no nos proporciona ninguna información adicional sobre esta posible nueva energía solar, pero cada uno de los modelos nos proporcionará una descripción detallada del estado global a largo plazo del sistema energético bajo el supuesto concreto del desarrollo de dicha tecnología. Comparando los tres modelos podemos obtener conclusiones sobre la idoneidad de que se desarrolle la tecnología. Para ello habrá que analizar las diferentes deducciones que realiza TIMES respecto a diferentes factores: el precio de la electricidad en cada modelo, las variaciones en inversión tanto en esta como en otras tecnologías, las variaciones en la demanda de electricidad y otros bienes energéticos, etc. Esta información puede ser muy relevante tanto para las empresas del sector, que necesitan datos para adaptarse al posible desarrollo de la tecnología, como para el sector público, que debe decidir las políticas energéticas. Por supuesto, la validez de este análisis dependerá del acierto de la modelización del sistema energético: es decir, de los supuestos del resto de escenarios, compartidos por los tres modelos.

El procedimiento de este ejemplo basado en el desarrollo incierto de una nueva tecnología sirve para ilustrar el método de trabajo en TIMES para cualquier supuesto que se quiera estudiar. Es importante entender que el análisis mediante esta herramienta de modelización se fundamenta en el uso de dos tipos de escenario: unos escenarios a los que podemos denominar *base* y otros escenarios *variables*.

Los escenarios *base* están compartidos por todos los modelos del estudio y persiguen el objetivo de representar de forma exhaustiva el sistema energético actual, así como los distintos componentes futuros que no consideramos inciertos. Si el conjunto de estos escenarios no es lo bastante minucioso para representar con exactitud el sistema energético estudiado las conclusiones que obtengamos serán inválidas.

Los escenarios *variables*, en cambio, permiten obtener conclusiones respecto a los efectos de situaciones contingentes sobre el conjunto del sistema energético. Estos escenarios analizados pueden representar situaciones hipotéticas alternativas (tal y como se ha

ilustrado en el ejemplo anterior) en cada uno de los principales componentes de la modelización mediante TIMES: en las curvas de demanda de servicios energéticos, en las curvas de ofertas de recursos primarios o en el conjunto de tecnologías disponibles. Sin embargo, también puede constituir parte de estos escenarios *variables* el cuarto componente de la metodología TIMES, es decir, las políticas energéticas. La interpretación de la inclusión de escenarios “variables” de política energética es significativamente distinta de la realizada hasta ahora, dado que los modelos resultantes no serán ya representaciones de situaciones inciertas, sino la modelización de las alternativas contempladas por el agente político decisor.

Es importante destacar que al tratar de realizar análisis empíricos mediante el modelo TIMES a través de los escenarios *variables* debemos considerar las relaciones que se establecen entre ellos, lo que aumenta considerablemente la complejidad del análisis en el largo plazo.

Volvamos al ejemplo anterior, en el que analizamos el posible desarrollo de una nueva tecnología solar. Habíamos conjeturado que se establecían 3 modelos para representar los supuestos de desarrollo de esa nueva tecnología considerados. Ahora imaginemos que la evolución de la demanda de energía eléctrica en los próximos años también presenta incertidumbre. El volumen de demanda de energía eléctrica afectará a la producción de energía, a las tecnologías utilizadas y a la inversión en nueva capacidad de generación. Por tanto, el volumen de demanda y las tecnologías disponibles (entre las que se encontrará o no la nueva energía solar) afectarán conjuntamente a los resultados calculados por el modelo. Los escenarios basados en las suposiciones de ambas incertidumbres no podrán considerarse por separado: habrá que analizar cada escenario del desarrollo de la nueva tecnología en función de cada uno de los escenarios de evolución de demanda de electricidad. Si consideramos tres posibles evoluciones de la demanda de energía y otras tres posibilidades de desarrollo de para la nueva tecnología solar en total deberíamos realizar 9 modelos. Por tanto, la inclusión de escenarios para representar situaciones de incertidumbre tendrá carácter exponencial.

Ahora bien, la metodología TIMES es una herramienta utilizada principalmente para el análisis de alternativas de política energética. Por tanto, habrá que analizar cómo se relaciona cada una de las posibles situaciones del sistema energético representadas mediante un modelo con cada una de las políticas energéticas a estudiar. Además, estas políticas no se aplican de forma independiente, sino en grupo, y también están

estrechamente relacionadas. Por ejemplo, imaginemos que entre las políticas analizadas se incluye un impuesto al diésel y otro a la gasolina. Si solo se aprobara uno de esos impuestos habría un aumento de la inversión en la tecnología que utiliza la materia prima alternativa (es decir, un aumento en la compra de vehículos de diésel o de gasolina). Si en cambio se aprueban ambos impuestos este efecto sustitución se reduce⁵. Por tanto, el número de modelos desarrollados para representar las posibles circunstancias del sistema energético deberá ser multiplicado por todas las posibles combinaciones de las políticas a analizar.

Por supuesto este aumento en la cantidad de modelos podría ser manejable mediante un sistema de bases de datos y suficiente capacidad de computación. Sin embargo, considerando el carácter a largo plazo de los análisis realizados mediante TIMES generalmente tendrá más sentido realizar suposiciones aproximadas para la mayoría de los factores de incertidumbre. En la realidad el número de posibles nuevas tecnologías de desarrollo incierto y con capacidad disruptiva no es tan elevado. Igualmente, tampoco es común plantear aplicar un cambio radical en las políticas que afectan al sistema energético de un país. Lo más común es que no se planteen abundantes cambios en las políticas actuales del sistema, lo que en TIMES podría representarse incluyendo estas políticas como escenario base. A su vez, el número de políticas que el decisor se plantee aprobar (individual o conjuntamente) también será limitado.

Modelización en TIMES y multiplicidad de criterios

La explicación anterior nos da un panorama general del método de trabajo mediante escenarios en el sistema TIMES. Recapitulando, los escenarios no son más que un conjunto de suposiciones que realizamos respecto a un sistema energético concreto. Los escenarios *bases* tratan de representar el conjunto del sistema energético y son compartidos por todos los modelos de nuestro análisis. Los escenarios *variables* representan las situaciones de incertidumbre y las políticas que queremos estudiar, diferencian unos modelos de otros y forman el principal medio de análisis mediante el sistema TIMES. Además, hemos señalado que los escenarios *variables*, a diferencia de los *base*, no persiguen la exhaustividad: debido al carácter de largo plazo de los estudios

⁵ Pese a que esta explicación tiene un carácter más económico que técnico estos efectos aparecen de forma automática en la modelización mediante TIMES si se incluye la demanda de transporte como una *commodity* única que se puede satisfacer con distintas tecnologías -lo que tiene más sentido que modelizar la demanda en transporte de diésel y en transporte de gasolina por separado-. El problema de optimización lineal aumentará el uso de la tecnología con menor coste (impuesto incluido).

mediante TIMES, para facilitar el análisis es recomendable realizar suposiciones respecto a los factores poco relevantes y limitar los escenarios *variables* para aquellas situaciones inciertas realmente disruptivas.

Por tanto, el trabajo de modelización de un sistema energético mediante TIMES para desarrollar un plan estratégico de energía comprenderá los siguientes pasos:

1. Modelizar el conjunto de factores presentes y futuros que afectan al sistema energético de una economía mediante una serie de escenarios *base*.
2. Determinar las principales fuerzas disruptivas de carácter incierto y modelizarlas mediante escenarios *variables*.
3. Determinar las posibles políticas energéticas a estudiar y representarlas mediante escenarios *variables*.
4. Extraer la información proporcionada por los modelos derivados de los escenarios anteriores y trabajar con ella para determinar el conjunto de políticas energéticas óptimo para una economía concreta.

Los dos primeros pasos se basan principalmente en la descripción del sistema eléctrico. Es necesario representar todos las *commodities* y las tecnologías que componen dicho sistema. Hay que realizar aproximaciones de la eficiencia, el coste, la máxima capacidad y otros factores relevantes para cada una de las tecnologías del sistema en la actualidad, así como para los desarrollos esperados dentro de los periodos abarcados por el estudio. Este es procedimiento minucioso, muy intensivo en tiempo y que requiere un profundo conocimiento del sistema energético analizado; factores que dificultan su desarrollo en el presente trabajo. Para superar este problema, en nuestra aplicación práctica nos valemos de las Demos proporcionadas por ETSAP (2021).

Los escenarios *variables* que modelizan situaciones inciertas deben soportar, como ya se ha mencionado, un papel más secundario, limitándose a representar factores realmente disruptivos. Por este motivo no se les ha prestado demasiado interés a la hora de afrontar la modelización del caso práctico de este trabajo. Para desarrollar los distintos modelos que proporcionarán la información necesaria para el problema de decisión se ha centrado el esfuerzo en los escenarios *variables* que representan políticas económicas, dado que estas constituyen el único factor controlable por el decisor. Sin embargo, la metodología podría modificarse para incluir en el análisis los escenarios de incertidumbre, siempre que se dispusiera información aproximada respecto a la probabilidad de ocurrencia de cada suceso.

Centrémonos ahora en el cuarto paso, el tratamiento de la información proporcionada por la modelización. Una vez desarrollados los modelos, el software VEDA nos presenta la solución al problema de optimización del sistema TIMES, incluyendo información respecto a las cantidades demandadas y los precios de cada una de las *commodities* representadas, así como las tecnologías utilizadas para obtenerlas. También nos proporciona el valor del *coste global* del sistema, variable objetiva del programa de minimización que constituye el núcleo de TIMES, tal y como ya se ha explicado.

La forma más fácil de trabajar con estos datos para determinar la influencia de un escenario *variable* es analizar simplemente las variaciones en el *coste global* de cada modelo respecto a un modelo de referencia que solo incluya los escenarios *base*. Este es, de hecho, el enfoque desarrollado en los manuales del sistema TIMES. En el caso del estudio de políticas, el aumento del *coste global* podría ser interpretado como la pérdida de eficiencia provocada por la política. Este enfoque puede compaginarse con ciertas condiciones de naturaleza política, como la inclusión de un límite al volumen total de emisiones de CO₂⁶, que pueden incluirse como escenarios *base*.

Ahora bien, este enfoque no considera un gran conjunto de criterios que podrían ser relevantes para decidir las políticas relativas al sistema energético. La función objetivo del problema de optimización de TIMES solo se centra en el sumatorio de las diferencias entre las curvas de demanda y oferta, descartando el resto de los factores que pueden ser importantes para el decisor y la sociedad, y que no vienen determinados por el sistema de precios especificado en el problema de optimización.

Pese a que no nos detendremos aquí en la explicación del concepto de externalidades desarrollado por la teoría económica, este factor es el que determina la utilidad de un enfoque multicriterio en este problema. Por ello, resulta conveniente ilustrar esta idea desde la metodología con la que estamos trabajando.

Desde la perspectiva del sistema TIMES podemos imaginar que el problema de optimización da como resultado la inversión en una serie de tecnologías que, debido a su mayor eficiencia, generan una reducción del *coste global*. Sin embargo, la forma concreta de la curva de oferta puede implicar que el desarrollo de estas tecnologías provoque que, pese a la disminución del *coste global* del sistema, aumente el precio al que se enfrentan

⁶ Este límite ya se ha explicado y es muy fácil de modelizar a través de un escenario. Tan solo hay que incluir en el modelo un escenario que establezca una restricción respecto al volumen máximo de la *commodity* CO₂.

los consumidores. Este aumento en el precio podría tener un efecto negativo sobre la equidad y el bienestar de la población, sobre todo cuando analizamos bienes básicos como la electricidad.

Las consecuencias sobre la equidad son un efecto externo no contemplado por el sistema de precios, lo que provocará que el equilibrio al que llega el mercado no coincida con el óptimo social. Por ello, al analizar la solución al problema de optimización presentado por TIMES no podemos interpretarla como el mejor equilibrio al que puede llegar un sistema energético, sino al equilibrio al que llegará dicho sistema de forma natural (partiendo de los supuestos considerados). Esto es lo que nos empuja a clasificar el generador de modelos TIMES como un sistema de predicciones mediante escenarios.

Por tanto, podemos concluir que el análisis mediante la variable objetivo del problema de optimización de TIMES (el *coste global*) es insuficiente. Este valor será extremadamente útil para representar el criterio económico en el problema de decisión, pero siendo conscientes de que este no es el único criterio del problema: las externalidades no incluidas en la optimización de TIMES también deben ser analizadas a la hora de seleccionar las políticas óptimas. Esto se puede conseguir gracias a que TIMES presenta los precios y las cantidades demandadas (o emitidas, en el caso de emisiones contaminantes) de todas las *commodities* del modelo. Entre las principales externalidades a analizar (es decir, criterios a incluir en el problema de decisión) destacarán las externalidades medioambientales y las externalidades en materia social (dominadas por el criterio de equidad).

Cabe recordar que este enfoque es precisamente el seguido por el Estudio Estratégico Ambiental del PNIEC (MITECO, 2020). Sin embargo, este estudio no explicaba la forma en la que estos criterios se estudiaban ni la herramienta multicriterio utilizada. Consideramos que el correcto análisis de las externalidades requiere de alguna herramienta concreta que permita decidir entre las distintas alternativas desde una metodología objetiva y no de carácter meramente descriptivo.

Aplicación práctica mediante AHP

En este subapartado hemos pretendido afrontar la problemática explicada realizando un caso práctico que integra los datos obtenidos mediante la modelización a través de TIMES con la herramienta de decisión multicriterio AHP. Esta herramienta (junto a desarrollos posteriores desarrollados por Saaty, como el ANP) ha sido utilizada con frecuencia para

afrontar problemas de valoración de intangibles y externalidades (Pérez y Pérez et al., 2013; Köne y Büke, 2007)⁷, lo que encaja con los objetivos perseguidos por este trabajo. Se ha decidido utilizar la metodología AHP por su capacidad para afrontar problemas de carácter discreto basados en alternativas (es decir, problemas de *valoración* multicriterio). Debido al funcionamiento mediante escenarios del sistema TIMES este es precisamente el tipo de problema al que nos enfrentamos, siendo cada alternativa un conjunto concreto de políticas en materia energética. Otros motivos que nos han llevado a seleccionar AHP han sido la claridad en la comparación de criterios gracias a un sistema jerárquico que permite la inclusión de valoraciones subjetivas en el establecimiento de los pesos y la sencillez de su aplicación práctica gracias al software Expert Choice.

Antes de comenzar la explicación de este apartado queremos señalar que tan solo se trata de un ejemplo concreto de la metodología aquí presentada. Sin embargo, un enfoque similar podría ser utilizado por cualquier decisor. Para ello habría que actualizar los pesos de cada criterio y las alternativas estudiadas. También podría ser necesario modificar el tipo de dato que trata de representar cada criterio y/o cambiar los criterios analizados.

Debemos recordar que la modelización del sistema energético utilizada es la que corresponde a la “Demo 12” de entre las publicadas por ETSAP (2021). Se ha decidido utilizar este recurso porque su carácter público permite seguir con mayor facilidad los pasos realizados en este trabajo⁸. Además, esta Demo es lo bastante completa para que el caso práctico desarrollado resulte representativo, pero a su vez evitamos utilizar una modelización excesivamente compleja para el desarrollo de un ejemplo.

Escenarios base

El proceso de construcción y los supuestos básicos del modelo base de esta “Demo 12” pueden ser consultados en la parte 4 de la documentación para TIMES (Goldstein et al, 2020). Para los objetivos del presente trabajo basta con señalar algunas indicaciones respecto a los escenarios base.

El modelo representa el sistema energético de dos regiones interconectadas: podemos interpretar que trabajamos en un país con un sistema federal con dos regiones, pero que

⁷ Estos ejemplos utilizan la metodología ANP, un desarrollo posterior de la metodología AHP realizado por el propio L. Saaty. Para el presente trabajo es ha considerado que las posibilidades de AHP eran suficientes para presentar la problemática planteada, pero la utilización de ANP también podría ser aplicable.

⁸ Para la realización de este ejemplo se planteó utilizar la modelización utilizada para el Estudio Ambiental de PNIEC, mencionado en numerosas ocasiones en este trabajo. Esta opción se descartó porque dicha modelización no tiene carácter público y no se logró el acceso a ella.

el problema de decisión se realiza a nivel nacional. El horizonte temporal analizado comprende desde 2005 hasta 2050. Se han representado en el modelo los sectores de materias primas, electricidad, industria y transporte. También se ha representado las distintas demandas finales de energía de los sectores agrícola, comercial y residencial. El conjunto de *commodities* y tecnologías representadas es amplio, por lo que en este trabajo solo se hará referencia a las requeridas para la construcción del modelo de decisión mediante AHP (el resto pueden consultarse en la documentación ya citada).

La representación general de este sector energético imaginario resumida en el párrafo anterior se ha incluido en el modelo a través de los escenarios *base* SysSetting y BASE. También se incluyen escenarios *base* para representar la entrada de nuevas tecnologías en el sistema (NewTechs), establecer las bases del comercio (TRADE_PARAM), establecer valores concretos para la demanda esperada en el sector de transporte (DemProj_DTCAr) y explicitar los valores que se utilizan para extrapolar los aumentos en el tiempo del volumen de demanda (DEM_Ref). Estos escenarios no tienen mayor transcendencia para este trabajo, pero se han mantenido porque gracias a ellos los resultados del modelo son más consistentes.

Respecto a los escenarios *base* que representan políticas energéticas, también se mantienen los presentados por la “Demo 12”. Estos incluyen límites superiores establecidos por el usuario para el refinamiento de petróleo (Refinery) y el volumen de energía nuclear (UC_NUC_MaxCap), así como un límite inferior a la tasa de penetración de energías renovables (BOUNDS-UC_WSETS). En nuestro ejemplo estos escenarios pueden ser interpretados como políticas que el sector público ya ha aprobado y no se plantea derogar.

Todos estos escenarios se observan en la siguiente imagen, capturada en el módulo *Run Manager* del software VEDA2.

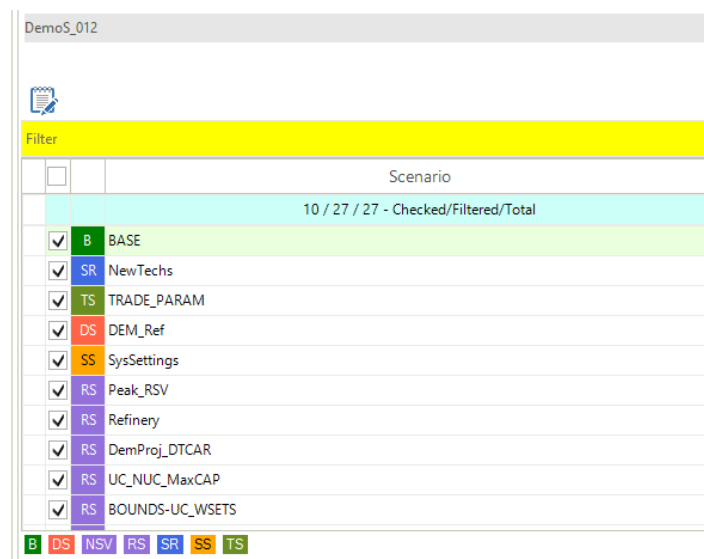


Ilustración 4 Fuente: ETSAP (2021)

Entre los escenarios *base* hay uno que no hemos señalado: el escenario PEAK_RSV. Este escenario está relacionado con un factor que no se ha mencionado hasta ahora en este trabajo: el modelo TIMES también modeliza los picos de demanda de energía a nivel diario y estacional. Esto es así porque la producción del sector energético no tiene como objetivo satisfacer el volumen medio de demanda, sino asegurar que se puede cubrir la demanda energética en todo momento. Para ello se define en el modelo la varianza de cada una de las demandas finales y la capacidad de contribuir a los picos de cada tecnología. El grado en que esto se consiga podría representar el criterio de seguridad en el suministro, considerado también en el Estudio Ambiental Estratégico analizado en este trabajo (MITECO, 2020).

Sin embargo, este criterio es difícil de medir mediante los datos que hemos obtenido a partir de la modelización mediante TIMES. Por eso hemos decidido mantener el escenario *base* PEAK_RSV, que establece la siguiente restricción: la oferta de energía eléctrica debe superar la media de la demanda pico en un 5% en 2005 e ir aumentando dicha diferencia hasta superar la media de la demanda pico en 2020 en un 20%. De nuevo, este escenario se interpreta como una política que el sector público no se plantea derogar. Esta política en concreto serviría para cubrir los requisitos del subcriterio seguridad en el suministro. Al ser una política común a todas las alternativas se puede suponer que todas tienen el mismo grado de seguridad en el suministro, por lo que podremos ignorar este criterio en la modelización mediante AHP.

Escenarios *variable*

Haremos uso de tres de los escenarios variables presentados en la “Demo 12” para desarrollar nuestras alternativas de política económica. Estos escenarios son los siguientes:

- Impuesto en el diésel del sector transporte (Scen_TRADSL_Tax).
- Subvención a la energía solar (Scen_Solar_Subsidies).
- Impuesto a las emisiones de CO₂/Límite al volumen total de emisiones de CO₂ (Scen_UC_CO2_Regions).

Las tablas que representan las restricciones establecidas por estos escenarios pueden consultarse en la parte 4 de la documentación de VEDA (Goldstein et al, 2020).

El escenario del impuesto al diésel se activa en el periodo 2015 y el escenario de la subvención a la energía solar se activa en el periodo 2010. Ambos incluyen valores distintos para cada una de las 2 regiones y parten de valores más bajos, hasta alcanzar sus máximos en el último periodo del modelo, 2050.

El escenario de límite al volumen total de emisiones de CO₂, en cambio, considera las dos regiones en conjunto, estableciendo el límite para la suma de las emisiones de ambas regiones (la variable “TOTCO₂”). Este límite se calcula como una reducción porcentual respecto al modelo sin escenarios *variable*. En concreto, se establece una reducción del 10% para 2020, que va aumentando hasta alcanzar un límite que reduce las emisiones del 2050 en un 15%. En realidad, el volumen absoluto del límite es menos restrictivo en el año 2050 que en el año 2020 (4.078.637 kt en 2020 frente a 4.632.568 kt en 2050), pero debido al aumento de emisiones calculado por el modelo sin escenarios *variables* se puede defender que este límite es en realidad más restrictivo en 2050.

Como ya se ha señalado en el marco teórico el límite al volumen total de emisiones tiene un carácter algo particular en el sistema TIMES: no solo permite conocer la situación del sistema energético si se alcanzara ese volumen de emisiones, sino que a través del *shadow Price* el sistema nos proporciona el tipo unitario del impuesto a las emisiones de CO₂ necesario para que dicho límite se alcance. Por eso vamos a interpretar este escenario como una política concreta de imposición.

También cabe señalar que este límite permite representar las condiciones reales del problema al que se enfrentan los estados cuando deciden sus políticas estratégicas en materia energética. En la actualidad un gran número de países ha adquirido compromisos

internacionales en materia de reducción de emisiones de CO₂. Para reflejar esta realidad en nuestro trabajo hemos decidido descartar todas las alternativas que no cumplan los límites establecidos por este escenario, suponiendo que este criterio es innegociable en el problema de decisión: las alternativas que no lo cumplan serán, por tanto, *no factibles*. Este enfoque es similar al utilizado por el Estudio Ambiental Estratégico (MITECO, 2020).

Como se verá enseguida, esto no implica que solo sean *factibles* las alternativas que incluyan el impuesto sobre el CO₂: también los modelos que no incorporen este escenario pueden cumplir el límite de emisiones. Esto provoca que sea conveniente incluir este escenario como *variable* y no como *base*.

Por último, a la hora de trabajar con los resultados mediante AHP es importante tener en cuenta en qué periodo se activan cada una de estas restricciones (o, lo que sería lo mismo, a partir de qué año se aplicaría cada una de las políticas consideradas). Por ejemplo, ningún escenario *variable* se activa antes del periodo de 2010, por lo que hasta ese momento los resultados de todos los modelos serán idénticos.

Alternativas

A partir de los escenarios anteriores construimos las alternativas para el problema de decisión. Cada alternativa incluirá una combinación concreta de políticas (escenarios *variable*). Las previsiones de los efectos de dichas políticas se calcularán a través de un modelo de TIMES. En este punto nos separamos de la “Demo 12”, dado que hemos decidido analizar un número superior de modelos.

Se establecen 8 alternativas, definidas según los escenarios que las componen, tal y como se refleja en la siguiente tabla:

ESCENARIOS	A0	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
BASE	X	X	X	X	X	X	X	X
Imp. Diésel		X			X	X		X
Subv. Solar			X		X		X	X
Imp. CO ₂				X		X	X	X

Tabla 2 Fuente:Elaboración Propia

Se definen los siguientes nombres a las alternativas para su utilización en VEDA:

A0	Escenario Base	A4	ImpDiselSubvSolar
A1	ImpDiesel	A5	ImpDieselImpCO2
A2	SubvSolar	A6	SubvSolarImpCO2
A3	ImpCO2	A7	TodasLasPolíticas

Estas alternativas se resuelven mediante VEDA para obtener las previsiones realizadas por TIMES. Los datos proporcionados por VEDA se dividen en Región 1 y 2. Dado que interpretamos que el problema de decisión analiza los resultados de las dos regiones conjuntamente estos han sido exportados a una base de datos y se han sumado los valores de ambas regiones para cada variable. Puede verse una selección de estos datos en el Anexo 1.

De entre los datos obtenidos centraremos nuestra atención en la tabla de emisiones de CO₂, para descartar en el análisis posterior las alternativas no factibles. Recordamos que el límite de emisiones de CO₂ al que suponíamos se había comprometido nuestro país era de 4.078.637 kt en 2020 frente a 4.632.568 kt en 2050. La siguiente tabla muestra las emisiones totales de CO₂ calculadas por VEDA para cada alternativa.

Scenariio	2005	2006	2010	2015	2020	2025
ModeloBase	3383136,467	3400459,837	3681462,629	4188491,313	4531819,409	5385523,314
ImpDiesel	3383136,467	3400459,837	3681462,629	3688424,687	3377785,422	3470839,114
SubvSolar	3383136,467	3400459,837	3681462,629	4188491,313	4531819,409	5381540,923
IMPCO2	3383136,467	3391488,733	3643228,205	3982128,731	4078637,468	4170959,205
ImpDieselSubvSolar	3383136,467	3400459,837	3681462,629	3688424,687	3377785,422	3466856,724
ImpDieselImpCO2	3383136,467	3400459,837	3681462,629	3688424,687	3377785,422	3470839,114
SubvSolarImpCO2	3383136,467	3391488,733	3643228,205	3968532,595	4078637,468	4170959,205
TodasLasPoliticas	3383136,467	3400459,837	3681462,629	3688424,687	3377785,422	3466856,724

Scenariio	2030	2035	2040	2045	2050
ModeloBase	5433434,146	5422576,531	5479784,923	5495238,198	5529988,85
ImpDiesel	3470401,771	3409975,128	3416362,813	3379712,095	3361043,061
SubvSolar	5429451,755	5418594,14	5475802,533	5491694,055	5529988,85
IMPCO2	4263280,941	4355602,678	4447924,415	4540246,152	4632567,888
ImpDieselSubvSolar	3466419,38	3405992,738	3412380,423	3376167,952	3361043,061
ImpDieselImpCO2	3470401,771	3409975,128	3416362,813	3379712,095	3361043,061
SubvSolarImpCO2	4263280,941	4355602,678	4447924,415	4540246,152	4632567,888
TodasLasPoliticas	3466419,38	3405992,738	3412380,423	3376167,952	3361043,061

Tabla 3 Fuente:Elaboración Propia

Hay varias cuestiones importantes a señalar a partir de estas tablas. La más evidente es que la alternativa “ModeloBase” y “SubvSolar” no cumplen los límites de emisiones de CO2. Al no satisfacer este criterio serán considerados alternativas *no factibles*, y no se considerarán alternativas en el problema de decisión mediante AHP.

La segunda cuestión relevante es que el escenario del impuesto al diésel provoca una reducción en las emisiones de CO2 superior a la requerida por el límite contemplado. Si se analizan los datos del sector transporte se puede ver que este impuesto ha provocado un desplazamiento de la demanda hacia la tecnología que representa los vehículos eléctricos, lo que ha tenido como resultado una gran reducción de las emisiones de CO2. Por ello, las alternativas que incluyan este escenario serán *factibles* pese a no incluir el escenario que representa el límite de emisiones (o impuesto sobre el CO2).

Ahora bien, como ya sabemos el escenario del impuesto sobre el CO2 no impone un impuesto concreto, sino un impuesto tal que las emisiones de CO2 estén por debajo del límite establecido. El valor de dicho impuesto variará según el resto de los escenarios del modelo. En el caso en que las emisiones de CO2 ya están por debajo del límite el valor del impuesto que establece este escenario es igual a cero. En nuestro problema esto implica que el escenario del impuesto sobre CO2 no tendrá ninguna influencia sobre el modelo cuando el escenario del impuesto al diésel esté activo. Esto significa que los modelos ImpDiesel e ImpDieselImpCO2 serán, de hecho, el mismo modelo. Ocurrirá lo mismo con los modelos ImpDieselSubvSolar y TodasLasAlternativas.

De esta explicación se deduce que disponemos de cuatro alternativas *factibles* para el problema de decisión planteado mediante AHP: ImpDiesel, ImpCO2, ImpDieselSubvSolar y SubvSolarImpCO2.

Jerarquía AHP

Una vez establecidas las alternativas *factibles* y las previsiones calculadas por TIMES para cada una de ellas es el momento de determinar la jerarquía de criterios que será utilizada para tomar una decisión mediante AHP. En lo alto de la jerarquía se establecerá la meta: seleccionar el conjunto de políticas óptimas para el sector energético. De ella saldrán una serie de criterios y subcriterios que nos permitirán alcanzar este objetivo.

Siguiendo la línea marcada por el Estudio Ambiental Estratégico (MITECO, 2020), hemos clasificado los criterios en cuatro grupos principales: Económicos, Sociales, Medioambiental y de Seguridad del Sistema. Consideramos que estos criterios

representan los principales factores al tener en cuenta a la hora de estudiar los efectos de las políticas energéticas. Cada uno de ellos se dividirá a su vez en varios subcriterios, que se medirán a partir de uno o varios conjuntos de datos obtenidos mediante TIMES.

Los pesos de cada criterio y cada subcriterio se establecerán mediante comparación a pares. Estas comparaciones deberán tratar de representar las preferencias del agente decisor. Para el caso de varios agentes decisores la metodología AHP incorpora un procedimiento que permite integrar las distintas preferencias de todos ellos. También se podría tratar de obtener, a través de encuestas u otras herramientas similares, las preferencias no solo del agente decisor, sino de toda la sociedad. En nuestro problema hemos supuesto mediante AHP un conjunto de preferencias que consideramos representativas y coherentes (Anexo 3).

A parte de lo anteriormente descrito, el carácter intertemporal de nuestro problema requiere que establezcamos un nivel más en nuestra jerarquía. Este último nivel permitirá considerar las preferencias respecto a la optimización intertemporal de los agentes. Así, para cada uno de los subcriterios considerados se incluirán datos de tres periodos distintos, de forma que se refleje la evolución de cada alternativa según cada criterio. De esta forma evitamos que se seleccione una alternativa por su valor en un periodo concreto ignorando su desarrollo posterior.

Recordemos que nuestro modelo incluye valores entre los periodos 2005 y 2050. Para incluir este enfoque intertemporal hemos considerado los datos de los periodos 2020, 2035 y 2050. Se ha decidido incluir valores desde 2020 porque es el primer periodo en que están activos todos los escenarios. La importancia que se da a cada uno de los periodos puede establecerse mediante comparaciones a pares (dentro del enfoque AHP) o se puede incorporar directamente un solo valor actualizado que se calcule como una media de los tres valores ponderada según las preferencias intertemporales.

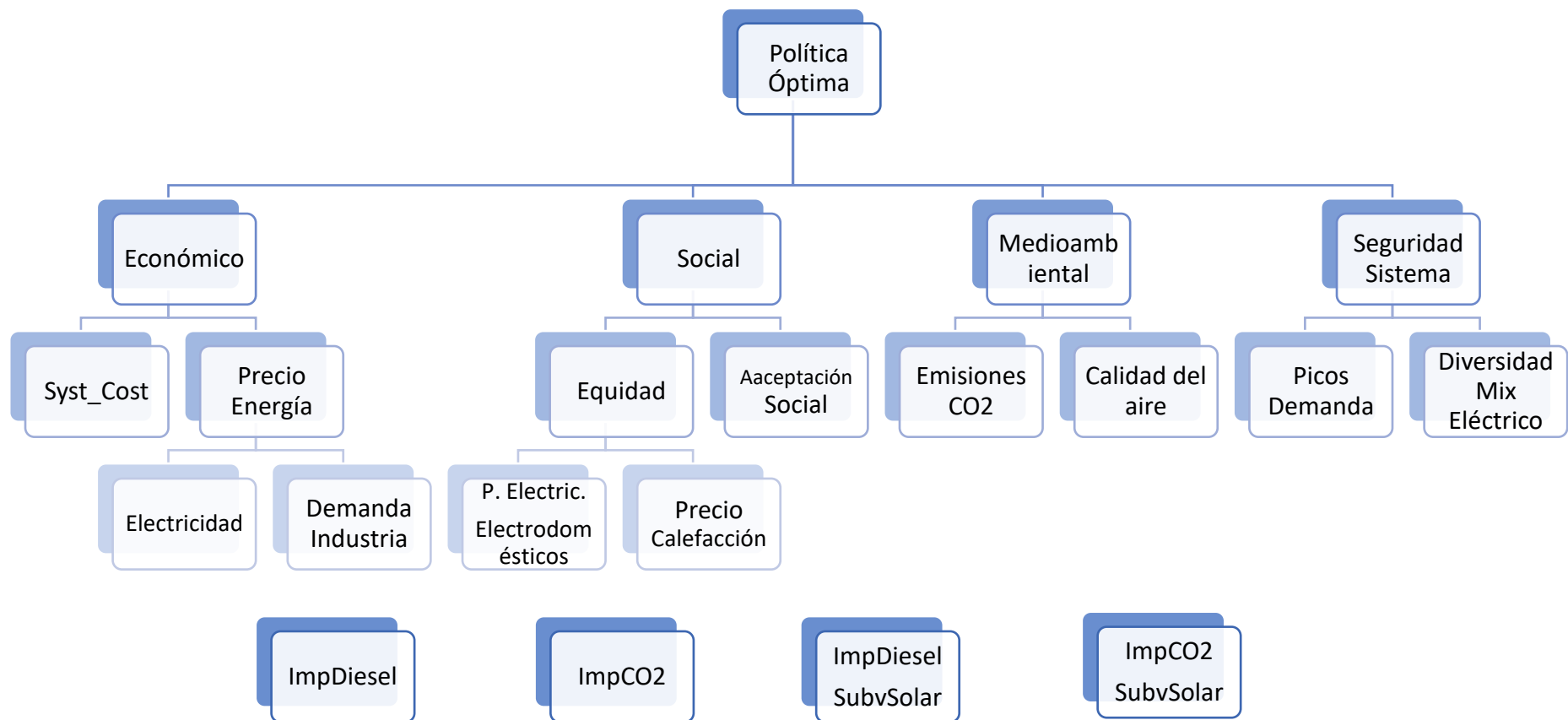
Se ha supuesto que las preferencias intertemporales son independientes del criterio considerado. Esto significa que el peso que la prioridad de cada periodo será igual en todos los subcriterios. También se ha supuesto que el decisor le da una mayor prioridad a los periodos más cercanos. En base a estos supuestos se ha establecido que la media actualizada aplicable a todos los criterios dará un peso del 40% para el valor del periodo de 2020, del 35% para el de 2035 y del 25% para el de 2050.

Sin embargo, hay una variable que no requiere este enfoque intertemporal porque ya viene actualizada por defecto en el sistema TIMES: los costes *globales*, variable objetivo del problema de optimización de TIMES. Esta variable se denomina *Sys_Cost* en el Software VEDA.

Respecto a esta variable, debemos recordar que es común basarse únicamente en su valor para comparar las distintas alternativas desarrolladas mediante una modelización en TIMES. Esto se basa en que el problema de optimización maximiza el Excedente Global del sistema energético, siendo la minimización del coste *global* el problema *dual* del anterior. Por ello, si no hubiera efectos externos no recogidos por el sistema de precios la variable *Sys_Cost* constituiría el único criterio relevante para nuestro problema. En esta argumentación nos hemos basado para dar a *Sys_Cost* un papel principal dentro del criterio económico. Con todo, dentro de este criterio hemos incluido también otros subcriterios, dado que consideramos que pueden ser fuente de importantes externalidades.

En la página siguiente se incluye un esquema general de la jerarquía de criterios utilizada. En dicho esquema faltaría incluir el último nivel, que representa las preferencias intertemporales. Ese nivel se ha ignorado tanto por motivos de claridad como porque para representar el criterio de preferencias intertemporales los valores se han incorporado ya actualizados a la metodología AHP. Si se quisiera representar en el esquema, de cada uno de los cuadros inferiores (excepto el de *Sys_Cost*) deberían salir tres cuadros adicionales para los periodos 2020, 2035 y 2050.

Debajo de la jerarquía se han representado también los cuatro conjuntos de políticas *factibles*.



Resulta indicado detenernos un poco a analizar cada criterio, señalando porque se ha escogido y que datos se han utilizado para representarlo.

Criterio Económico: Efectos sobre el desarrollo económico del país.

- Sys_Cost: Como ya hemos señalado tiene un gran peso porque representa el excedente total del problema de optimización. Siguiendo el enfoque aconsejado en la metodología de TIMES (Loulou, 2021) se va a trabajar con el valor de la diferencia de cada modelo respecto al modelo base (en vez de con el valor absoluto).
- Precio energía: Creemos que el precio de la energía tiene una gran importancia para el desarrollo económico y puede generar externalidades sobre otros sectores. Por ello hemos incluido este criterio, representándolo mediante el precio neto de la electricidad y el precio de la energía demandada por la industrial⁹.

Criterio Social: Efectos sobre la población y los grupos en riesgo social.

- Equidad: Aquí nos centramos en el precio de la energía para la población, considerando que un aumento en los precios puede afectar con gravedad al bienestar de los grupos más desfavorecidos. Concretamente, consideramos los precios de la energía para aparatos del hogar (DRAP) y para calefacción en el hogar (DRSH)¹⁰. El primer precio es equivalente al precio de la electricidad doméstica y se diferencia del precio neto de la electricidad porque requiere del uso de tecnologías que la hagan llegar a los hogares; el precio de la energía para calefacción se diferencia del anterior porque también utiliza fuentes de energía distintas a la electricidad (carbón, gas, etc).
- Aceptación Social: Este criterio representa las preferencias subjetivas de la población respecto a las fuentes de energía. Particularmente, se ha tratado de representar el rechazo social a la energía nuclear: será preferida según este criterio la alternativa que menos electricidad genere mediante esta tecnología.

Criterio Ambiental: Efectos sobre el medio ambiente y la salud de la población.

⁹ Al trabajar con una versión reducida del software Expert Choice, en la que solo se pueden incluir 3 niveles de jerarquía, nos hemos visto obligados a incorporar estos factores como subcriterios que salen directamente del nodo de criterio económico. Sin embargo, en esta memoria se mantiene el enfoque con un nivel adicional porque consideramos que expresa con más claridad los objetivos de la modelización.

¹⁰ La explicación anterior se aplica también para este subcriterio.

- Emisiones totales de CO₂: Este es un criterio que solo se ha tratado como límite superior, sirviendo para seleccionar las alternativas *factibles*. No se analiza mediante AHP porque se considera que las reducciones de emisiones por debajo del límite son indiferentes para el decisor.
- Calidad del aire: Se relaciona con el criterio anterior, pero tiene una escala más local. Representa los efectos de la contaminación atmosférica sobre la salud de la población. Se ha representado mediante la producción de energía eléctrica a través de centrales térmicas.

Seguridad del Sistema: Capacidad del sistema energético para enfrentarse a *shocks* y aumentos inesperados de la demanda.

- Picos de Demanda: Representa el exceso de capacidad de la oferta del sistema energético sobre la media de la demanda en momentos de pico. Cuanto mayor sea más blindado estará el sistema frente a fluctuaciones en la demanda. Como ya se ha señalado, la política respecto a este criterio se ha incluido mediante un escenario *base*, por lo que el valor será el mismo para todas las alternativas y no deberá analizarse mediante AHP. Sin embargo, por su relevancia y la posibilidad de ser analizado con mayor profundidad en futuros trabajos, nos ha parecido oportuno incluirlo en la jerarquía.
- Diversidad en el sistema eléctrico: Este criterio representa la capacidad del sistema eléctrico para sobreponerse a eventos que afecten a alguna de las fuentes de generación que lo componen. Para obtener un valor que lo represente se ha calculado el productorio del volumen generado por todas las fuentes de generación para cada uno de los periodos en cada alternativa¹¹. Dado que todos los modelos producen el mismo volumen total de electricidad cuanto mayor sea este valor mayor será la diversidad del sistema.

Todos los datos necesarios para la resolución del problema de decisión según la jerarquía aquí explicada (así como su actualización según las preferencias intertemporales) se encuentran disponibles en el Anexo 2. Las comparaciones a pares que se han realizado en Expert Choice para decidir los pesos de los criterios y subcriterios pueden consultarse en

¹¹ Para este cálculo ha sido necesario establecer un valor de uno para la producción de las tecnologías no utilizadas en cada modelo. En un caso real lo más probable es que todas las tecnologías tengan cierta producción. También se ha aplicado la raíz séptima (dado que se han representado 7 tecnologías) a los datos obtenidos. Esta operación solo sirve para que los datos sean más manejables, sin que pierdan por ello representatividad del criterio analizado.

el Anexo 3. La siguiente imagen muestra como queda planteado el problema en Expert Choice, incluyendo el valor de las prioridades locales (peso de cada módulo respecto al inmediatamente superior).

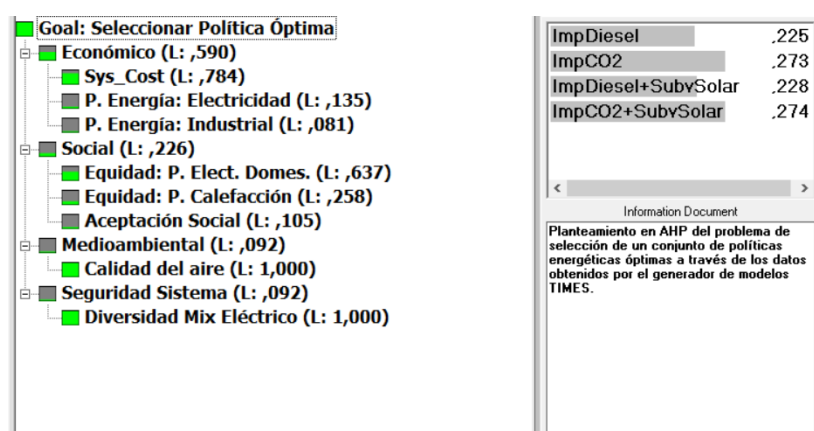


Ilustración 5 Fuente: Elaboración Propia

Todos los subcriterios se han analizado a través del *data grid* de Expert Choice, utilizando funciones que se ajusten a los datos que representan cada criterio, según las interpretaciones ya explicadas. Concretamente se ha establecido una función creciente para el criterio de Diversidad del Mix eléctrico (dado que es el único criterio en el que se prefieren valores más altos) y funciones decrecientes para el resto de los criterios. Las funciones establecidas tienen formas convexas porque suponemos que esta forma representaría mejor las preferencias del decisor. Los límites superiores de estas funciones se han establecido con cierto margen respecto al valor más alto de cada criterio¹². La tabla en la que se especifican estas funciones se puede consultar en el Anexo 3.

RESULTADOS

Tras introducir todos los supuestos respecto a las preferencias del decisor y los datos obtenidos mediante TIMES en el programa Expert Choice obtenemos la valoración de las Alternativas según AHP. En el caso práctico considerado se concluye que, por una diferencia mínima, la alternativa óptima es la que incorpora tanto el escenario de

¹² Dado que la inclinación de las funciones de preferencia depende de los límites superiores e inferiores que se les apliquen, de los límites concretos que se establezcan puede depender la resolución del problema. Si en este trabajo no se les ha prestado mayor atención es porque consideramos que, debido a la relativa sencillez del sistema energético modelizado y la falta de información respecto a las preferencias del decisor, no se puede desarrollar una metodología coherente para el establecimiento de límites que pudiera aplicarse posteriormente a un caso real. Un enfoque válido sería establecer valores mínimos para cada criterio sin los cuales una alternativa no sería *factible*: estos valores servirían también como límites para la función de preferencias.

Impuesto sobre CO2 como el escenario de subvención solar. Esto implica que el decisor político debería aplicar las dos políticas modelizadas mediante esos dos escenarios.

Sin embargo, en base a los objetivos perseguidos por este trabajo lo que nos interesa no es tanto que alternativa se selecciona, sino los motivos que subyacen a esta decisión. Para ello resulta adecuado interpretar la tabla y el gráfico siguiente.

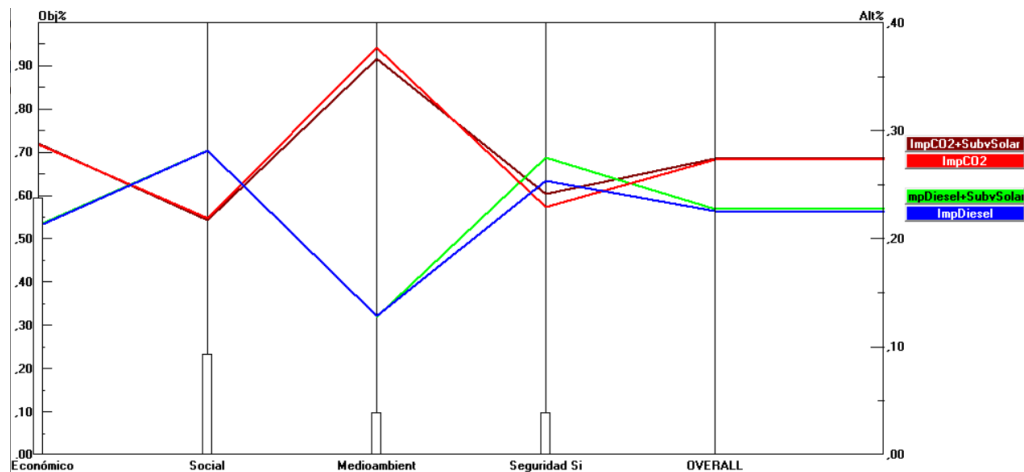


Ilustración 6 Fuente: Elaboración Propia

Ideal mode		DECR	DECR	DECR	DECR	DECR	DECR	DECR	INCR
Alternative	Total	Sys_Cost (L: .784)	P. Energía: Electricidad (L: .135)	P. Energía: Industrial (L: .081)	Equidad: P. Elect. Domes. (L: .637)	Equidad: P. Calefacción (L: .258)	Aceptación Social (L: .105)	Calidad del aire (L: 1,000)	Diversidad Mix Eléctrico (L: 1,000)
ImpDiesel	.576	1780133	99.44	13.5	26.34	15.61	3771	7464.3	189.3
ImpCO2	.700	154204	116.37	16.11	30.557	18.72	3771	4998.2	158.5
ImpDiesel+SubvSola	.583	1774695	99.47	13.53	26.34	15.61	3771	7464.3	225.23
ImpCO2+SubvSolar	.702	146936	115.49	16.29	30.64	18.98	3771	5121.4	173

Tabla 4 Fuente: Elaboración Propia

Lo primero que observamos en la gráfica es la poca relevancia de la política de subvención solar para el problema de decisión modelizado: las alternativas que la incorporan y las que no obtienen valores casi idénticos para la mayoría de los criterios, exceptuando el criterio de diversidad del Mix Eléctrico.

Para analizar porque ocurre esto no basta con estudiar los datos incorporados a AHP, sino que es necesario retroceder en el análisis para analizar los datos obtenidos mediante TIMES. En estos datos se observa que la política de subvención a la generación eléctrica solar apenas tiene efectos sobre el precio de la electricidad. Si que tiene efectos, en cambio, sobre el Mix Eletrico, dado que en estos modelos el sistema utiliza esta tecnología para el periodo 2050, mientras que en los modelos que no incorporan la subvención esta tecnología es ignorada completamente.

Ahora bien, un cambio en las fuentes de generación de electricidad también podría tener consecuencias sobre la calidad del aire y la aceptación social, dado que estos criterios se definen a partir de datos relacionados con la producción de electricidad. Si el aumento de la producción mediante energía solar provocara una disminución de la producción de las centrales térmicas las alternativas que incluyen la subvención serían también preferidas desde la perspectiva del criterio de calidad del aire. Esto no ocurre en nuestro modelo porque la estructura del sistema energético representado provoca que el aumento en la producción solar se compense exclusivamente mediante reducciones de la producción eléctrica mediante energía eólica.

Una vez analizada la poca relevancia de la política de subvención solar nos queda determinar porque la política de impuesto sobre el CO₂ es preferida al impuesto sobre el diésel. Esto se debe, por un lado, a la estructura de las preferencias definidas en AHP y, por otro, a la propia definición de los escenarios analizados.

La definición de preferencias mediante comparaciones a pares en AHP para nuestro modelo ha provocado que el criterio económico tuviera un peso muy alto, del 59%. Esto provoca que la alternativa con un mayor valor en este criterio parta desde una situación muy ventajosa en el problema de decisión. A su vez, dentro del criterio económico hemos dado una prioridad de casi el 80% al criterio *Sys_Cost*. Se ha considerado que, debido a la explicación teórica de esta variable analizada con anterioridad, este criterio requería un peso muy superior a otros. Esta consideración ha supuesto que el impuesto al CO₂ sea preferido al impuesto al diésel según el criterio económico, incluso cuando el impuesto al diésel no aumenta tanto el precio de la energía.

Ahora bien, aunque esta explicación es correcta desde el enfoque AHP, resulta también incompleta. Para entender la decisión tomada es necesario volver a retroceder para analizar los supuestos realizados en TIMES. Resulta especialmente relevante el hecho de que, a diferencia del impuesto sobre el diésel, el impuesto sobre el CO₂ no se define mediante un valor concreto. Recordamos que el escenario que definía esta política se basaba en un límite superior sobre el volumen total de emisiones, por lo que el valor del impuesto era el mínimo necesario para satisfacer este límite. Al minimizar el valor del impuesto también estamos minimizando la pérdida de eficiencia, lo que genera que esta política sea preferida desde el criterio económico.

El escenario del impuesto sobre el diésel no se definía de esta manera, sino que se establecía mediante un valor concreto. Recordemos que esto ha provocado que las emisiones de CO₂ en este escenario se redujeran bastante por debajo del valor necesario. Esto provoca una pérdida de eficiencia que podría haber sido evitada estableciendo un valor para el impuesto más bajo, pero lo bastante alto para satisfacer la restricción de emisiones. Además, debido a los supuestos que hemos hecho respecto a las preferencias del decisor la reducción de emisiones adicional no se ha considerado relevante para la decisión mediante AHP.

Aunque hubiéramos ajustado el impuesto sobre el diésel para minimizar la pérdida de eficiencia el escenario del límite sobre el CO₂ hubiera obtenido una valoración superior en el criterio Sys_Cost. Esto es así porque este escenario se define como el valor del impuesto sobre el CO₂ que permite alcanzar el límite de emisiones considerado minimizando la pérdida de eficiencia. Sin embargo, el impuesto sobre el diésel obtiene mejores valores en los criterios de equidad y de precio de la energía. Por tanto, una definición más ajustada del escenario que representa este impuesto podría haber provocado que este acabara siendo la alternativa seleccionada.

CONCLUSIONES

Este trabajo ha pretendido demostrar la posibilidad de integrar las herramientas multicriterio (más concretamente, la metodología AHP) en el análisis de políticas mediante el sistema generador de escenarios TIMES. En esta memoria se ha defendido en numerosas ocasiones que el desarrollo de un enfoque similar es necesario para superar el carácter descriptivo del tratamiento de los datos obtenidos mediante TIMES de algunos trabajos anteriores.

Para lograr la meta de integrar las herramientas de decisión multicriterio y el sistema TIMES, este trabajo ha debido hacer frente a una serie de objetivos intermedios.

En un primer lugar ha sido necesario entender el funcionamiento del sistema TIMES, así como los principios económicos que subyacen al mismo. Esta profundización en los fundamentos teóricos de TIMES podría no haber sido necesaria si el único objetivo hubiera sido extraer datos sobre un sistema energético, pero resulta imprescindible a la hora de modelizar el problema de decisión mediante AHP. Sobre todo es fundamental

interpretar correctamente el problema de optimización que forma el núcleo de TIMES. Solo de esta forma se comprenden dos factores clave para el diseño de la jerarquía AHP:

- La importancia de la variable *costes globales* dentro del problema de decisión, sobre todo dentro del criterio económico.
- La necesidad de considerar otros datos para tratar de representar las externalidades no recogidas por el sistema de precios.

Por otro lado, también se ha alcanzado a través de este trabajo un conocimiento relevante respecto a las herramientas de decisión multicriterio. En un primer lugar se ha buscado entender las distintos grupos de estas herramientas, analizando sus objetivos, ventajas y debilidades para elegir aquella herramienta que mejor se adaptara a nuestro problema. Superado este paso, se ha profundizado en la metodología AHP, presentando las distintas posibilidades de la misma (jerarquización de criterios, comparación a pares, valoración de alternativas mediante funciones de preferencias, etc.). Estos conocimientos y la metodología desarrollada para trabajar con la herramienta AHP nos permitiría enfrentarnos a una gran variedad de problemas de decisión distintos del planteado en este trabajo.

Consideramos que la satisfacción de estos objetivos ha sido demostrada gracias al caso hipotético que hemos modelizado.

Todo ello nos ha permitido desarrollar una nueva metodología que permite extraer los datos obtenidos en el análisis mediante escenarios TIMES y aplicarlos a una jerarquía que, según el enfoque AHP, nos permita obtener la política óptima en función de las preferencias concretas representadas. En nuestra opinión, este enfoque es mucho más adecuado que el mero tratamiento descriptivo de los datos, dado que presenta de forma explícita tanto las variables analizadas como las preferencias que han guiado la decisión. El ejemplo práctico desarrollado en el trabajo ha permitido ilustrar estas ideas, demostrando la posibilidad de utilizar esta metodología ante casos reales de selección de políticas energéticas.

Dicho lo cual, también creemos que debemos apuntar algunos problemas a los que se enfrentaría nuestra metodología ante un caso real y que, por distintos motivos, no han sido abordados en este trabajo.

En primer lugar, debemos señalar que en un caso real sería necesario un grado de exhaustividad superior al establecido en nuestro caso práctico. Esta exhaustividad es imprescindible en la modelización mediante TIMES, pero también en el diseño de la jerarquía AHP y en la selección de los datos que representarían cada criterio. Por un lado, la cantidad de criterios a considerar en un caso real es elevada y deben representarse todos ellos para asegurar que la alternativa seleccionada es la óptima. Por otro lado, no basta con tomar algún dato para cada criterio, sino que hay que considerar todos los datos relevantes.

Por ejemplo, en nuestro caso práctico hemos representado la calidad del aire mediante la producción de las centrales térmicas: este enfoque no sería adecuado para un caso real, porque ignora los efectos de las políticas sobre la contaminación producida por vehículos y calefacciones. Además, también podría resultar adecuado representar la calidad del aire mediante dos criterios distintos: uno que considere la contaminación a nivel nacional y otro en grandes conglomeraciones urbanas. Este enfoque sería más adecuado para representar los diferentes efectos de este tipo de contaminación sobre la población. Con todo esto tan solo tratamos de señalar la dificultad de modelizar la abundancia de criterios y datos que habría que analizar en un caso real.

Otro problema de nuestra metodología, tal y como ya hemos señalado con anterioridad, podría provenir de la interpretación de las políticas a analizar como alternativas de carácter discreto. El número de políticas a analizar será generalmente limitado, pero el carácter continuo de los valores de las mismas supone un problema para nuestro planteamiento. Esto parte de la base de que cualquier impuesto o subvención puede tomar infinitos valores, lo que supone un problema relevante para la metodología aquí presentada. La única solución que hemos encontrado es reducir el problema de decisión a un conjunto limitado de valores que represente el espacio de posibilidades de cada política.

El problema anterior no merma por completo la utilidad de nuestra metodología, pero si consideramos necesario desarrollar en el futuro una estrategia que permita seleccionar el valor óptimo de cada política según los criterios establecidos.

Por último, este trabajo no ha prestado demasiada atención al establecimiento de la forma concreta de las preferencias del problema de decisión. Estas preferencias dependerán del decisor y el problema concreto por lo que, considerando que nuestro objetivo era

presentar una metodología general que sirviera para cualquier problema de decisión, no nos parecía apropiado detenernos sobre el tema. Sin embargo, en el establecimiento de preferencias concretas hay que enfrentarse a una serie de cuestiones que no son baladí, como la selección de la forma y los límites de las funciones de preferencias, necesarias para la toma de decisión.

Ahora bien, debemos señalar que todas estas dificultades no son más que la traslación a nuestra nueva metodología de la problemática ya presente en el análisis de políticas económicas basado exclusivamente en el sistema TIMES. Cabe preguntarse, por tanto, qué es lo que ha aportado este trabajo. Nosotros consideramos que hemos aportado una nueva perspectiva que permite enfrentarse a estos problemas desde una metodología objetiva y coherente. Este trabajo presenta un enfoque teórico que permite especificar los datos, criterios y preferencias utilizados en la toma de decisión y que asegura que la política seleccionada se base en ellos, evitando la arbitrariedad. Si este enfoque se desarrollara con carácter público facilitaría el debate científico y social, necesario para mejorar la toma de decisiones en materia de política energética.

BIBLIOGRAFÍA

- Ram C., Montibeller G. y Morton A. (2011). “Extending the use of scenario planning and MCDA for the evaluation of strategic options”, *Journal of the Operational Research Society*.
- ETSAP (15 de junio de 2021) “ETSAP DemoS Models”. <https://iea-etsap.org/index.php/etsap-demos-models>
- Goldstein G., Gargiulo M., Kanudia A. (2020) “Documentation for the TIMES model. PART IV: VEDA 2.0” Recuperado el 1 de mayo de 2021, del Sitio web de ETSAP: [https://iea-etsap.org/docs/Documentation for the TIMES Model-Part-I.pdf](https://iea-etsap.org/docs/Documentation%20for%20the%20TIMES%20Model-Part-I.pdf)
- Hasan M., Chapman R. y Frame D. (2020). “Acceptability of transport emissions reduction policies: A multi-criteria analysis”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 133.
- Köne, A.C., Büke, T. (2007). “An analytical network process evaluation of alternative fuels for electricity generation in Turkey”. *Energy Policy*, 35, pp. 5220-5228.2

- Loulou, R. (2021). “Documentation for the TIMES model. PART I” Recuperado el 1 de mayo de 2021, del Sitio web de ETSAP:
https://iea-etsap.org/docs/Documentation_for_the_TIMES_Model-Part-I.pdf
- Ministerio Para la Transición Ecológica y Reto Demográfico (2020). “Estudio ambiental estratégico. Plan nacional integrado de energía y clima. 2021-2030”
https://www.miteco.gob.es/images/es/eae_pniec_tcm30-506493.pdf
- Moreno Jiménez, J.M. (2002): El Proceso Analítico Jerárquico. Fundamentos, Metodología y Aplicaciones. En Caballero, R. y Fernández, G.M., Toma de decisiones con criterios múltiples. RECT@, serie monográfica nº 1, 21-53.
- Pérez y Pérez, L., Egea Román, M. P., & Sanz Cañada, J. (2013). “Externalidades territoriales en la Denominación de Origen Aceite del Bajo Aragón” Teruel, no 93 [II], pp. 149–171. <http://hdl.handle.net/10532/2203>
- Romero, C. (1993): Teoría de la Decisión Multicriterio. Conceptos, técnicas y aplicaciones. Alianza Universidad Textos.
- Saaty, T.L. (1980): The Analytic Hierarchy Process. McGraw-Hill, New York.